

Effet Doppler

I. Mise en évidence et définition de l'effet Doppler

Sirène de pompier : https://www.youtube.com/watch?v=w_KXH0Q8iJY

klaxon : <https://www.youtube.com/watch?v=a3RfULw7aAY>

Trompette : <https://www.youtube.com/watch?v=8WgSQLRymwE>

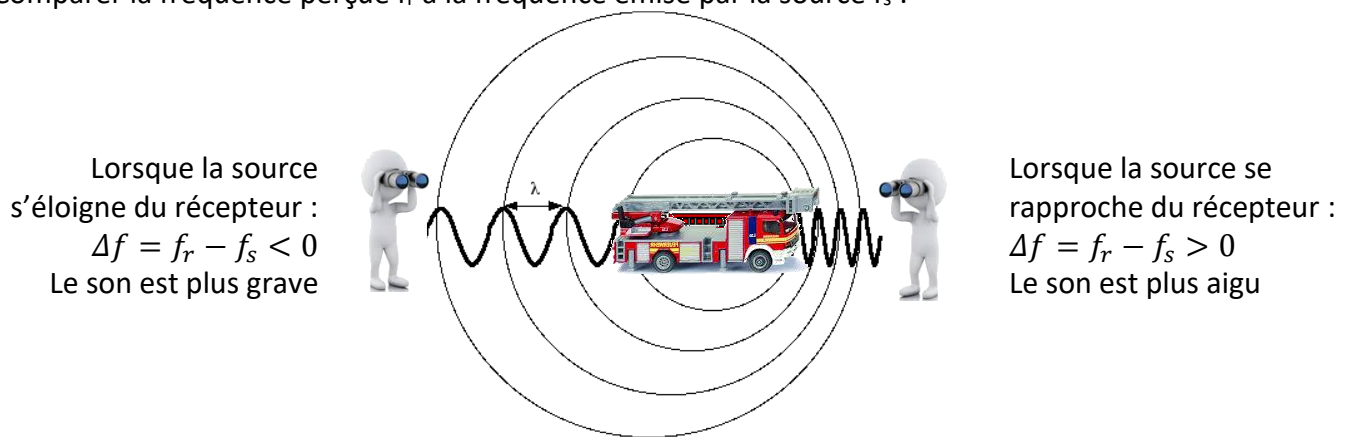
Modélisation : http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Ondes/son/doppler.php

Définition :

L'effet Doppler est un phénomène qui a lieu lorsqu'un émetteur d'ondes (sonore, ultrasonore, lumineuse...) est en mouvement relatif par rapport à un récepteur (capteur, observateur...)

Il résulte de ce mouvement un décalage entre la fréquence émise par la source f_s et la fréquence perçue par le récepteur f_r .

Comparer la fréquence perçue f_r à la fréquence émise par la source f_s :



Document :

Soit f_s la fréquence de la source, f_r la fréquence perçue par l'observateur et c la vitesse de l'onde émise par la source.

- Si la source se rapproche de l'observateur à la vitesse v , alors : $f_r = \frac{f_s}{(1 - \frac{v}{c})}$
conséquence : $f_r > f_s$ (son perçu plus aigu)
- Si la source s'éloigne de l'observateur à la vitesse v : $f_r = \frac{f_s}{1 + \frac{v}{c}}$
conséquence : $f_r < f_s$ (son perçu plus grave)

II. TP : Mesure de vitesse en utilisant l'effet Doppler

En utilisant une interface d'acquisition (Latispro ou phybox), proposer un protocole pour déterminer la vitesse en km/h de la voiture dans laquelle le trompettiste joue (acquisitions, mesures et calcul à réaliser).

Mettre en œuvre le protocole.

On prendra : vitesse du son : $c = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Correction

Protocole :

- Acquérir le son produit par la trompette lorsque la voiture se rapproche de l'observateur
Déterminer la fréquence f_r par l'observateur (en utilisant le spectre du son)

- Acquérir le son produit par le klaxon lorsque la voiture est à la hauteur de l'observateur
Déterminer la fréquence f_s de la source (en utilisant le spectre)
- Calculer la vitesse de la voiture en utilisant la formule $f_r = \frac{f_s}{1 - \frac{v}{c}}$, soit $v = c \cdot \left(1 - \frac{f_s}{f_r}\right)$

Résultats :

- Fréquence de la source : $f_s = 347,33 \text{ Hz}$ (fa)
 - Fréquence reçue par l'observateur sur le bord de la route : $f_r = 369,97 \text{ Hz}$ (fa #)
- $$v = 340 \times \left(1 - \frac{347,33}{369,97}\right) = 20,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

III. Application de l'effet Doppler à la vélocimétrie : radar Doppler

La mesure de vitesse intervient dans un très grand nombre de procédés technologiques dans des domaines très variés : industrie, médecine, sport, transport, aérospatiale, ...

1. Vélocimétrie et sécurité routière

La police et la gendarmerie peuvent utiliser des radars portatifs pour réaliser des contrôles de vitesse des véhicules. Le radar est alors pointé dans la direction de la voiture.

Le manuel du radar portatif indique que celui-ci envoie des ondes électromagnétiques haute fréquence ($3,47 \times 10^{10} \text{ Hz}$) et mesure la différence de fréquence entre l'onde émise et l'onde réfléchi sur un objet en mouvement.



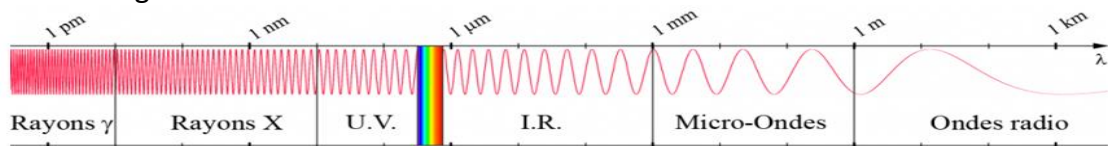
Radar portatif utilisé lors de la mesure de la vitesse (indiquée en $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$).

- 1.1. Identifier le domaine des ondes électromagnétiques émises par ce radar portatif. Justifier par un calcul.
- 1.2. Nommer le phénomène à l'origine de la différence de fréquence entre les ondes émises et reçues par le radar portatif.
- 1.3. Le radar portatif est positionné face à la voiture. La fréquence de l'onde reçue est-elle inférieure ou supérieure à celle de l'onde émise ? Justifier.
- 1.4. Dans les mêmes conditions de mesure que pour la question 1.3, le décalage Δf entre la fréquence $f_{\text{émise}}$ de l'onde émise et la fréquence $f_{\text{reçue}}$ de l'onde reçue vérifie la relation

$$|\Delta f| = |f_{\text{reçue}} - f_{\text{émise}}| = \frac{2v_0 \cdot f_{\text{émise}}}{c}$$

Le décalage $|\Delta f|$ mesuré par le radar portatif est 4,86 kHz.

En déduire la valeur de la vitesse de la voiture. Vérifier l'accord avec l'indication de l'écran du radar portatif de la figure.



Correction :

- 1.1. Calcul de la longueur d'onde dans le vide correspondant aux ondes électromagnétiques utilisées :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{A.N.} \quad \lambda = \frac{3 \times 10^8}{3,47 \times 10^{10}} = 8,6 \times 10^{-3} \text{ m} = 8,6 \text{ mm}$$

Cette longueur d'onde correspond à des micro-ondes

- 1.2. Il s'agit de l'effet Doppler qui apparaît lorsque la source et l'observateur sont en mouvement l'un par rapport à l'autre.
- 1.3. La voiture et le radar se rapproche l'un de l'autre. La fréquence reçue par le radar est donc plus élevée.
- 1.4. Vitesse de la voiture :

$$v_0 = \frac{c \cdot \Delta f}{2 \cdot f_{\text{émise}}} \quad \text{A.N.} \quad v_0 = \frac{3,0 \times 10^8 \times 4,86 \times 10^3}{2 \times 3,47 \times 10^{10}} = 21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 76 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

Le résultat est en accord avec la valeur lue sur le cinémomètre.

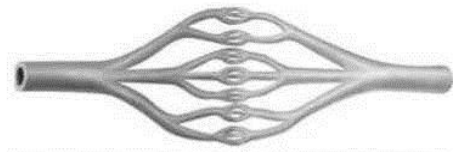
2. La vélocimétrie Doppler en médecine

La médecine fait appel à l'effet Doppler pour mesurer la vitesse d'écoulement du sang dans les vaisseaux sanguins (figure 2).

Un émetteur produit des ondes ultrasonores qui traversent la paroi d'un vaisseau sanguin. Pour simplifier, on suppose que lorsque le faisceau ultrasonore traverse des tissus biologiques, il rencontre :

- des cibles fixes sur lesquelles il se réfléchit sans modification de la fréquence ;
- des cibles mobiles, comme les globules rouges du sang, sur lesquelles il se réfléchit avec une modification de la fréquence ultrasonore par effet Doppler (figure 3).

différents
vaisseaux du
lit vasculaire



vitesse de
l'écoulement
sanguin
(cm/s)

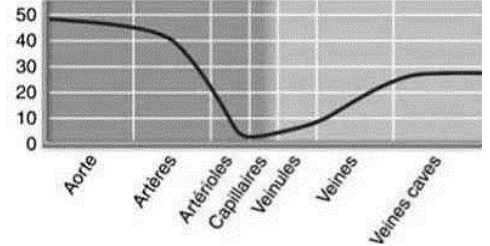


Figure 2. Vitesse moyenne du sang dans différents vaisseaux sanguins. ©2011 Pearson

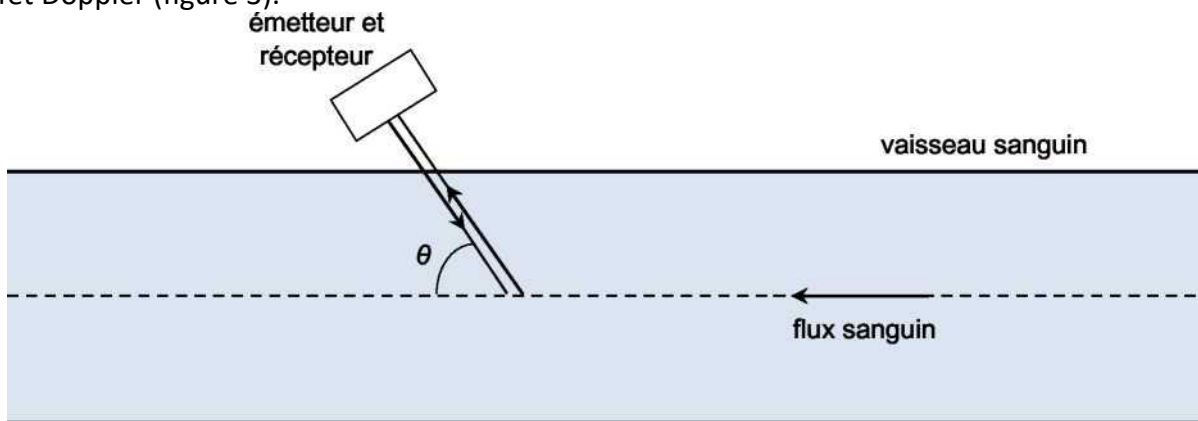


Figure 3. Principe de la mesure d'une vitesse d'écoulement sanguin par effet Doppler (échelle non respectée).

L'onde ultrasonore émise, de fréquence $f_E = 10 \text{ MHz}$, se réfléchit sur les globules rouges qui sont animés d'une vitesse v . L'onde réfléchie est ensuite détectée par le récepteur.

La vitesse v des globules rouges dans le vaisseau sanguin est donnée par la relation

$$v = \frac{v_{\text{ultrason}}}{2 \cos \theta} \cdot \frac{\Delta f}{f_E}$$

Où Δf est le décalage en fréquence entre l'onde émise et l'onde réfléchie, v_{ultrason} la célérité des ultrasons dans le sang et θ l'angle défini sur la figure 3.

On donne $v_{\text{ultrason}} = 1,57 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $\theta = 45^\circ$.

2.1. Le décalage en fréquence mesuré par le récepteur est de 1,5 kHz. Identifier le(s) type(s) de vaisseaux sanguins dont il pourrait s'agir.

2.2. Pour les mêmes vaisseaux sanguins et dans les mêmes conditions de mesure, on augmente la fréquence des ultrasons émis f_E . Indiquer comment évolue le décalage en fréquence Δf . Justifier.

Correction :

2.1. Calcul de la vitesse des globules rouges :

$$v = \frac{1,57 \times 10^3 \times 1,5 \times 10^3}{2 \times \cos 45^\circ \times 10 \times 10^6} = 1,7 \times 10^{-1} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 17 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$$

Il s'agit des artérioles ou veinules.

2.2. Si on augmente f_E , Δf doit également augmenter puisque v doit rester constant.